

## **Исследование работы оптико-электронных систем программными средствами**

И. Р. Кабилов, email: ilsur.inbox@gmail.com, Д. С. Монгуш, В. Г. Бондарев, Д. В. Лопаткин, С. В. Ипполитов

ВУНЦ ВВС «ВВА им. Проф. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

***Аннотация.** В статье рассмотрены аспекты проектирования оптико-электронных систем в контексте оптимального выбора их параметров. Предложена методика исследования работы проектируемой оптико-электронной системы при помощи программных средств посредством спектрально-энергетического расчета с целью получения как качественной, так и количественной оценки детектирования полезного сигнала в условиях воздействия помех. Представлены результаты экспериментальных исследований.*

***Ключевые слова:** оптико-электронные системы и приборы, техническое зрение, фотоника, оптотехника.*

### **Введение**

В настоящее время оптико-электронные технологии находят все более широкое применение в различных сферах деятельности человека: в народном хозяйстве, научных исследованиях, связи, военной и космической технике и многих других областях. Все большее развитие получают системы технического зрения не только в составе роботизированной техники, автомобилях, но и в системах контроля качества на производстве и на борту летательных аппаратов.

Одним из этапов проектирования оптико-электронной системы (ОЭС) является анализ возможных сценариев ее применения в реальных условиях и оптимальный выбор спектрального рабочего диапазона длин волн, который бы обеспечивал высокое соотношение сигнал/шум для решения поставленных задач системами конкретного назначения. Совершенствование методов проектирования и испытаний ОЭС, в частности, дальнейшее развитие предварительного компьютерного моделирования самих систем и условий их эксплуатации представляется актуальной задачей.

Исходными данными, необходимыми для оценки функционирования оптико-электронных приборов (ОЭП), входящих в состав ОЭС, являются:

- спектрально-энергетические характеристики возможных источников полезных сигналов, безошибочный прием которых требуется обеспечить;
- спектрально-энергетические характеристики возможных источников оптических помех, которые требуется максимально подавить;
- спектральные характеристики чувствительности цифровых матриц ОЭП;
- условия работы проектируемой ОЭС (время суток, погодные условия, работа против солнца и т.д.);
- спектральные характеристики пропускания интерференционных фильтров, применяемых для повышения соотношения сигнал/шум;
- спектральные характеристики отражающей способности (альbedo) различных поверхностей земной поверхности.

Для повышения помехозащищенности приходится также следить за оптимальным соотношением между параметрами ОЭП, объекта интереса, а также среды распространения излучения.

### **1. Методика исследования работы оптико-электронной системы**

Для анализа работы проектируемой ОЭС можно использовать прикладное программное обеспечение. Покажем, как использовать такой инструментарий.

В рамках проведения эксперимента использовалась ОЭС, состоящая из монохромной матричной камеры Hikrobot MV-CA016-10GM и узкополосного интерференционного фильтра Azure BP950EN, параметры и характеристики которых представлены в соответствующих спецификациях производителей. Причем спектральные характеристики приводятся в виде графиков, а значит могут быть использованы для программных расчетов только после их оцифровки. В заданном диапазоне график можно аппроксимировать функцией, представленной разложением ряда Фурье с конечным количеством его членов. Однако такое решение задачи при условии необходимости высокой сходимости функции с графиком может быть громоздким и в целом избыточным. Таким образом, достаточным выглядит получение массива значений точек графика с определенной частотой дискретизации, которая выбирается в зависимости от вида графика. Очевидно, что чем больше выбросов значений имеет график, тем на большее количество интервалов необходимо разделять график для уменьшения погрешности.

Процесс оцифровки графиков можно осуществить при одной из существующих программ по оцифровке графиков (например, GetData Graph Digitizer). Обозначая оси с минимальным и максимальным

значением по осям и задавая необходимую частоту дискретизации по оси абсцисс, получаем набор точек, который экспортируем в таблицу Microsoft Excel (рис. 1).

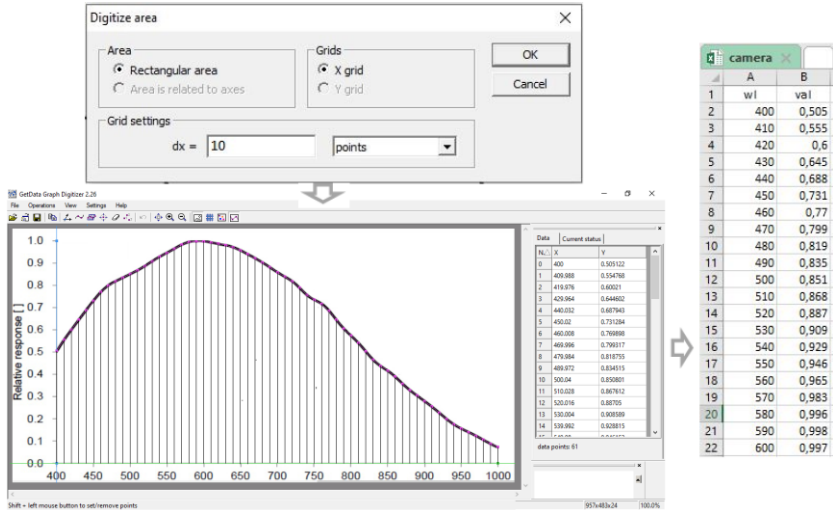


Рис. 1. Оцифровка графика спектральной характеристики чувствительности камеры

Далее в программной среде Matlab импортируем сохраненный файл с расширением .xls с массивом точек. Аналогичным образом поступаем с графиком спектральной характеристики пропускания фильтра. Перемножив массивы значений двух графиков (рис. 2), получаем результирующую спектральную характеристику чувствительности камера, оборудованной фильтром (рис. 3). Ключевым аспектом подобных вычислений является выбор одинаковых значений длин волн по оси абсцисс. То есть при выборе единой для характеристик всех элементов ОЭС частоты дискретизации необходимо ориентироваться на график, имеющий большее количество выбросов.

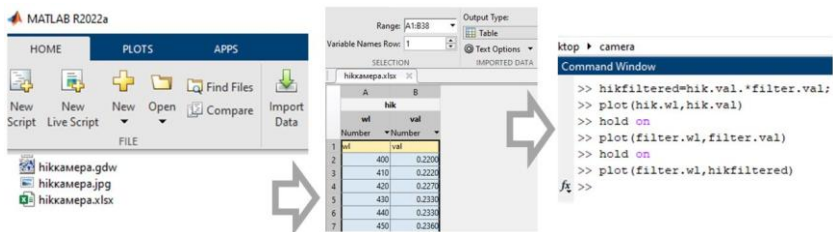


Рис. 2. Работа с массивами точек и построением графиков в среде Matlab

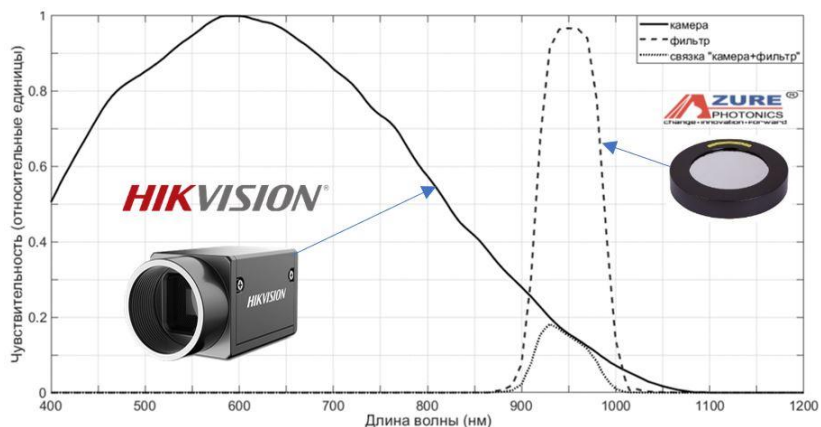


Рис. 3. Спектральные характеристики чувствительности камеры и пропускания фильтра и результирующей спектральной характеристики ОЭС

Для расчетов конкретной ОЭС иногда требуется заранее выяснить особенности ее работы в различных сценариях обстановки. С этой целью, имея спектрально-энергетические характеристики излучения источников оптического излучения помехи (например, Солнца), полезного сигнала (например, ИК-светодиодов), а также предполагаемых элементов ОЭС (камеры, фильтра), можно получить спектральные характеристики излучения, попадающего непосредственно на матрицу и оценить соотношение сигнал/шум.

Как известно, основным и наиболее мощным источником оптического излучения в светлое время суток является Солнце, излучение которого блокирует нормальную работу ОЭС из-за высокой

энергии светимости в широком и практически непрерывном спектре длин волн.

С физической точки зрения Солнце представляет собой практически абсолютное черное тело, эффективная температура которого примерно равняется 5800 К. Однако, достигая поверхности Земли солнечное излучение испытывает поглощение и рассеяние в атмосфере, из-за чего теряет энергию, особенно в видимой и ближней ИК-зоне излучения, и имеет участки спектра, в которых ослабляется в значительной мере или даже полностью блокируется атмосферой, что обуславливает видимую разницу между графиками, полученными для солнечного излучения вне атмосферы Земли и на уровне моря (рис. 4).

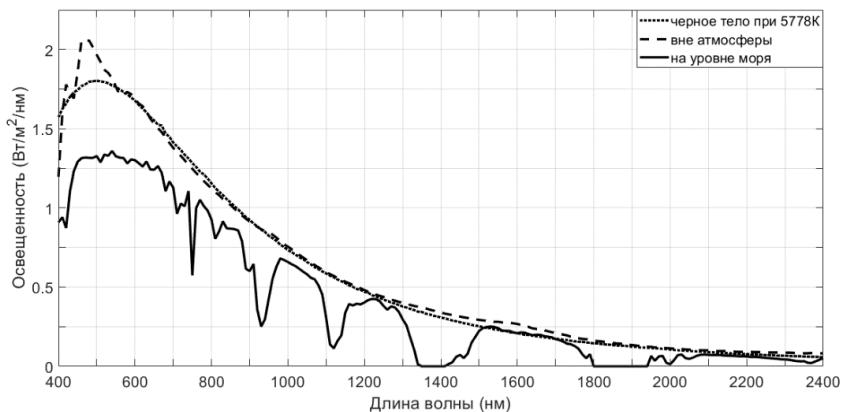
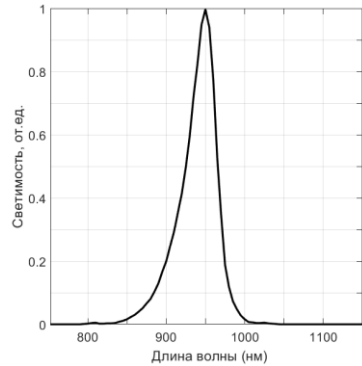


Рис. 4. Спектральный состав солнечного излучения

На рис. 5,а приведен фотоснимок ОЭС, запечатлевший излучение маячной группы из 3-х ИК-светодиодов с длинной волны 950 нм со спектральной характеристикой, представленной на рис. 5,б. Как можно отметить, солнечное излучение ослабляется интерференционным фильтром, так как его спектральная характеристика пропускания в значительной мере совпадает со спектральным диапазоном ослабления солнечного излучения атмосферой (~900-950 нм). Картина излучения светодиодов, мощность которых составляет всего 1 Вт, практически не претерпевает изменений в светимости, что обусловлено совпадением спектра их излучения со спектром пропускания фильтра. При увеличении мощности источников полезного сигнала и работе в диапазоне, в котором солнечное излучение минимально, возможно получить много большее соотношение сигнал/шум на фотоматрице, а значит выделять полезный сигнал с большей эффективностью.

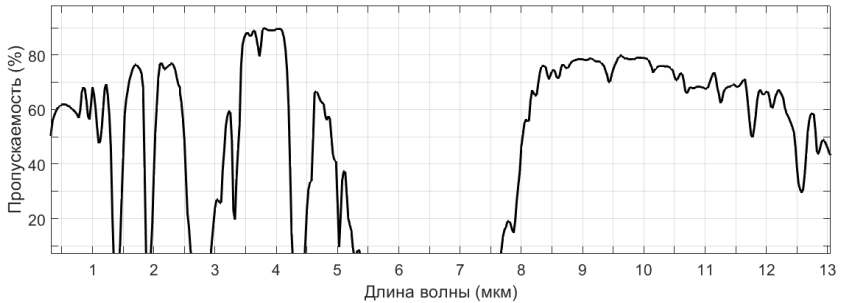


а

б

*Рис. 5.* Кадр излучения на фоне Солнца маячной группы из трех ИК-светодиодов (а) и их спектральная характеристика (б)

Что касается распространения излучения в приземном слое, то наиболее мощным поглощением обладают молекулы воды  $H_2O$ , углекислого газа  $CO_2$ , озона  $O_3$ , слабее поглощают молекулы закиси азота  $N_2O$ , угарного газа  $CO$ , метана  $CH_4$ . В совокупности они создают так называемую картину поглощения излучения атмосферой (рис. 6), в которой отмечается наличие «окон» пропускания в диапазонах: 1,2-1,4; 1,5-1,8; 2,1-2,4; 3,3-4,2; 4,5-5; 8-13 мкм.

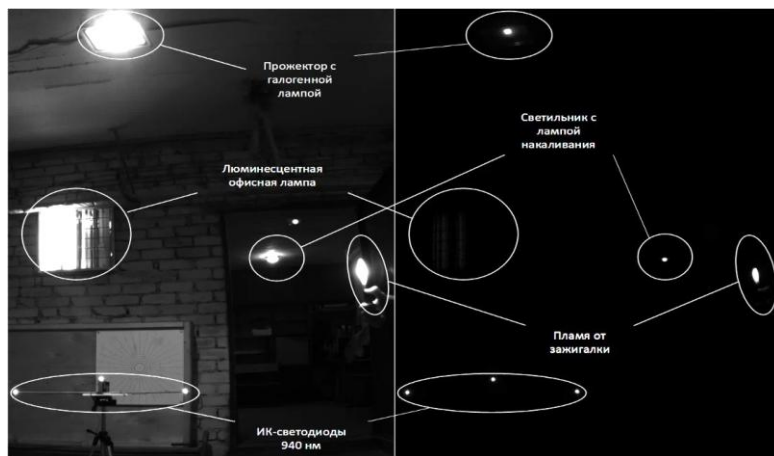


*Рис. 6.* Картина поглощения излучения атмосферой в приземном слое

Исходя из вышеизложенного, для эффективной работы в сложных метеоусловиях (дождь, туман, снег, дым) предпочтительно использовать длину волны излучения, находящуюся в одном из таких «окон»

пропускания (1,2-1,4 или 1,5-1,8 мкм), а также и в зоне минимума спектра солнечного излучения (1,33-1,43 мкм). Как видим, одного спектрального диапазона, обеспечивающего одинаково хорошую работоспособность ОЭС в сложных метеоусловиях и одновременно против солнца не существует, поэтому целесообразно использовать длину волны 1,38 мкм для работы ОЭС против солнца, а 1,54 мкм - при работе в условиях плохой видимости. Отечественная промышленность освоила производство мощных полупроводниковых ИК-лазеров, особенностью которых является когерентность излучения, а также камеры коротковолнового ИК-диапазона (0,9-1,7 мкм) и узкополосные интерференционные фильтры, обеспечивающие в совокупности работу ОЭС даже в трудных условиях.

Работу ОЭС при наличии достаточных исходных данных можно оценить не только качественно, но и количественно. Покажем это на примере проведенного эксперимента. В кадре съёмки вышеупомянутой ОЭС были размещены различные источники оптического излучения наряду с группой из трех маячков на основе ИК-светодиодов с длиной волны 940 нм, являющихся для нас в данном случае источником «полезного сигнала». Левая фотография (рис. 7,а) была сделана без интерференционного фильтра, а правая (рис. 7,б) – с установленным фильтром.



а

б

*Рис. 7.* Фотоснимки сравнения излучения группы ИК-маячков на фоне других источников излучения без применения фильтра (а) и с применением фильтра (б)

Как можно наблюдать, после применения фильтра менее всего в яркости потеряли ИК-маячки, пламя от зажигалки, светильник с лампой накаливания, в большей степени – прожектор с галогенной лампой. Свечение люминесцентной офисной лампы практически перестало быть различимым.

Оценим данные эффекты количественно. Для этого оцифровываем типовые графики спектральных характеристик. Путем умножения полученных массивов точек при помощи пакета MatLab получаем спектральные характеристики светимости источников излучения путем умножения их типовых спектральных характеристик излучения последовательно сначала на спектральную характеристику чувствительности используемой камеры (рис. 8,а) и на спектральную характеристику пропускания используемого фильтра (рис. 8,б).

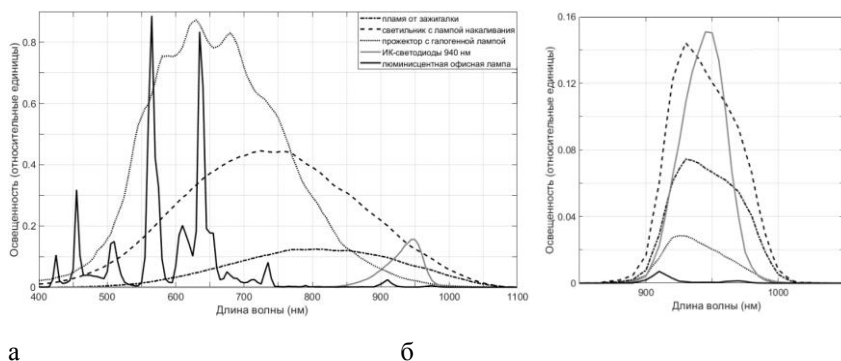


Рис. 8. Спектральные характеристики излучения на матрице камеры без применения фильтра (а) и с применением фильтра (б)

Площадь под графиком спектральной характеристики источника излучения на матрице определяет интегральный уровень освещенности, получаемый от данного источника. Имея массив точек графика, эту площадь можно вычислить методом трапеций при помощи функции  $\text{trapz}(x,y)$ , где  $y$  – значение функции (освещенность по спектру),  $x$  – значение переменной (длина волны). Получая таким образом численные значения энергетической яркости источников излучения на матрице камеры при снятом и установленном фильтре, хоть и в относительных единицах, и разделяя вторые величины на первые, получаем так называемый коэффициент пропускания излучения конкретного источника, который выражен безразмерной величиной в диапазоне от 0 до 1, где 0 означает блокировку излучения источником фильтром, а 1 – его полное пропускание через фильтр.



Таблица 1

*Яркости источников излучения до и после применения фильтра*

Источник излучения		Освещенность, отн. ед.		Коэффициент пропускания излучения через фильтр
		без фильтра	с фильтром	
1	ИК-светодиоды 940 нм	9,271	6,439	0,695
2	Пламя от зажигалки	38,582	4,962	0,129
3	Светильник с лампой накаливания	144,668	9,133	0,063
4	Прожектор с галогенной лампой	207,343	1,619	0,008
5	Люминисцентная офисная лампа	38,130	0,219	0,006

Полученные результаты, представленные в табл. 1, достаточно точно отражают эмпирически полученные результаты.

### **Заключение**

В статье рассмотрены некоторые аспекты проектирования ОЭС в контексте оптимального выбора их параметров с учетом возможных сценариев работы. Исследование работы проектируемой ОЭС целесообразно проводить при помощи программных средств посредством спектрально-энергетического расчета с целью получения как качественной, так и количественной оценки детектирования полезного сигнала в условиях воздействия помех, а также выработки рекомендаций по повышению соотношения сигнал-шум. Представленная методика опробована в эксперименте с имеющимся в распоряжении оборудованием (матричная камера, интерференционный фильтр, источники излучения).

### **Литература**

1. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов учебник для ВУЗов / Ю. Г. Якушенков. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2012. – 568 с.
2. Козирацкий Ю.Л. и др. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов. Монография. / Под ред. Ю.Л. Козирацкого. – М.: Радиотехника, 2015. – 456 с.
3. Козирацкий А.Ю., Гревцев А.И., Капитанов В.В., Алабовский А.В. Оптико-электронные устройства: учебное пособие. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – 144 с.

4. Бондарев В.Г. Проценко В.В., Агеев А.М., Обоснование выбора источников излучения для системы технического зрения в задаче автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, – № 2. – С. 239–245.